



## Descripción de herramientas computacionales aplicadas para analizar el riesgo ocasionado por flujos piroclásticos

### Computational tools description applied to analyze the risk caused by pyroclastic flows

#### Autores:

Jhonny Penna Salcedo\*  
Elsa Adriana Cárdenas Quiroga\*\*  
Luz Yolanda Morales\*\*\*  
Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá Colombia

Fecha de presentación: Marzo 15 de 2013  
Fecha de aceptación: Mayo 15 de 2013

## Resumen

Este artículo presenta la descripción de tres herramientas computacionales aplicadas a la simulación y evaluación de la reología de las corrientes piroclásticas de densidad, además de los modelos empleados para la determinación del comportamiento de dichos flujos. Las herramientas consideradas fueron TITAN2D, VolcFlow y FLOW3D; se analizaron teniendo en cuenta autores, sistema operativo, enfoque, variables y resultados.

## Palabras clave:

Flujos piroclásticos, línea de energía, FLOW3D, TITAN2D, VOLCFLOW.

## Abstract

This paper offers a description of three computing tools applied to simulation and evaluation of rheology for pyroclastic density flows, besides models used to establish behaviour of such flows. Tools considered were TITAN2D, VolcFlow and FLOW3D; analyzed considering authors, operating system, approach, variables and results obtained.

\* Ingeniero en Mecatrónica. [u1801096@unimilitar.edu.co](mailto:u1801096@unimilitar.edu.co)

\*\* Geóloga. Especialista en Docencia Universitaria. Magister en Gestión Ambiental. [elsa.cardenas@unimilitar.edu.co](mailto:elsa.cardenas@unimilitar.edu.co)

\*\*\* Ingeniera Civil. Especialista en Proyectos de Desarrollo. Magister en Educación. Doctora en Ciencias de la Ingeniería. [Luz.morales@unimilitar.edu.co](mailto:Luz.morales@unimilitar.edu.co)



## Revista Academia y Virtualidad

### Key words:

Pyroclastic flows, Energy line, FLOW3D, TITAN2D, VOLCFLOW

### 1. Introducción

Existen alrededor del mundo muchas ciudades que han sido construidas en cercanías de los volcanes activos, lo cual constituye un factor de riesgo tanto por la posibilidad de pérdida de vidas humanas, como por las afectaciones sobre la infraestructura y sobre el desarrollo de las actividades económicas. A principios del siglo 21, más de medio billón de personas se estima que viven en situación de riesgo de erupciones volcánicas y, aunque no hay una estimación reciente, este número se cree que ha crecido debido al incremento en la urbanización y la gran sobrepoblación que enfrenta el mundo. Entre los pequeños asentamientos urbanos que viven a la sombra de un volcán potencialmente activo, también hay grandes ciudades con población cercana o superior a un millón de habitantes como Nápoles, Italia (cerca del Vesubio), Ciudad de México, México (cerca de Popocatepetl), Kagoshima, Japón (cerca de Sakura-Jima), Arequipa, Perú (Cerca de El Misti). (Constantinescu, 2012).

Como un mecanismo encaminado a la evaluación y gestión del riesgo, haciendo uso de la evolución tecnológica y la gran capacidad de procesamiento que proveen los computadores modernos, se realizan simulaciones en software especializado para analizar el comportamiento de los productos generados por volcanes, determinando así las zonas con mayor grado de afectación, que permita realizar acciones de choque contra estos fenómenos naturales sin arriesgar la población.

Las herramientas computacionales de simulación, constituyen un instrumento muy útil para la

evaluación de amenazas por flujos piroclásticos asociadas a erupciones de volcanes activos. En el modelado de éste tipo de amenazas se han empleado modelos matemáticos en los cuales se considera a los flujos como un bloque que desliza sobre una superficie, en donde la fuerza de gravedad es la que genera el movimiento así como flujos secos de material granular en donde las propiedades reológicas del flujo, tales como la viscosidad y la cohesión, juegan un papel importante en cuanto a la movilidad que puede alcanzar dicho flujo, la velocidad máxima lograda por el mismo y la distancia a la que puede llegar. Basados en los modelos matemáticos se han desarrollado diferentes programas en los que las propiedades reológicas de éste tipo de materiales, permiten simular su comportamiento, facilitando la generación de mapas que permiten calcular las áreas de afectación.

El objetivo de este artículo es comparar las herramientas computacionales TITAN2D, VolcFlow y FLOW3D creadas para facilitar la simulación de flujos piroclásticos, con el fin de establecer de acuerdo con sus características, cuál de ellas es la más apropiada para utilizar como parte de una metodología de evaluación de riesgos, basada en los registros geológicos, modelación numérica y la evaluación probabilística de los flujos piroclásticos generados por un colapso columna eruptiva.

Los referentes teóricos para el estudio comparativo de las herramientas computacionales TITAN2D, VolcFlow y FLOW3D tomados para éste trabajo incluyen la descripción de las corrientes de densidad piroclástica, su clasificación y principales características ya que constituyen el objeto de simulación de cada uno de estos programas.



## Revista Academia y Virtualidad

### 1.1 Corrientes de densidad piroclástica

Se denominan de esta forma los flujos que se desplazan sobre la superficie del terreno por influencia de la gravedad. Estos en su movimiento alcanzan altas velocidades y están constituidos por partículas y gas. Comprenden un amplio rango que incluye corrientes turbulentas formadas por explosiones laterales o por el colapso de columnas verticales de erupción o avalanchas granulares formadas por el colapso de domos de lava. Generan depósitos de gran volumen y pueden alcanzar distancias que superan los 100 km desde su origen. Los vulcanólogos han clasificado dos tipos de corrientes de densidad piroclástica de acuerdo a sus propiedades dinámicas y las características de los depósitos resultantes.

#### 1.1.1 Flujos piroclásticos

Se denomina de ésta manera a los depósitos pobremente clasificados formados por material que fluye impulsado por la gravedad. Por lo general ocupan las zonas topográficamente bajas por lo que tienden a ser canalizados hacia los valles. La mayoría de estos flujos se ha formado por colapso de domos de lava y genera lo que se conoce como flujos de bloques y de ceniza.

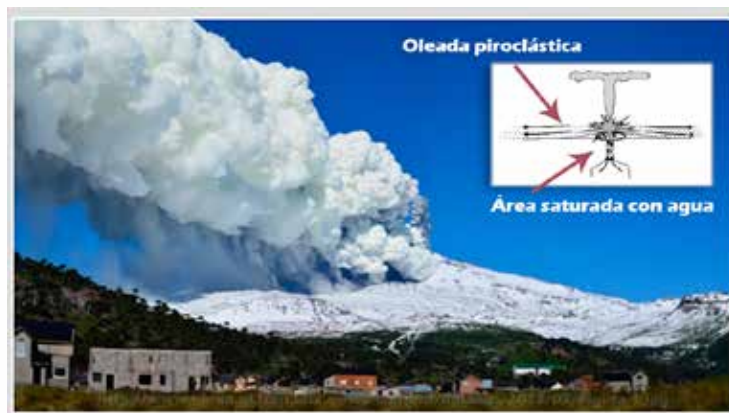
Los flujos piroclásticos ocasionados por el colapso de columnas de erupción son denominados flujos de pómez o escoria / cenizas de acuerdo el tipo de componente juvenil.

#### 1.1.2 Oleadas piroclásticas

Son formadas comúnmente durante erupciones freatomagmáticas en las cuales el magma entra en contacto con el agua. Las oleadas se expanden

hacia afuera como nubes radiales a través conducto volcánico, viajando a altas velocidades como suspensiones turbulentas (ver figura 1), sin embargo las distancias alcanzadas, rara vez exceden unos pocos kilómetros y las temperaturas, por lo general se encuentran en el rango de los 100 – 250 ° C.

Los depósitos por lo general son bien estratificados a escala centimétrica y exhiben estratificación cruzada, planar u ondulada. (Druitt, 1998, pp.145-182).



**Figura 1.** Modelo de erupción freatomagmática. En las cercanías del conducto con la superficie el magma entra en contacto con abundante agua, generando una onda expansiva horizontal, denominada oleada piroclástica. (Druitt, 1998, p.145-182).

### 1.2 Modelos empleados para el comportamiento de flujos

Un enfoque comúnmente utilizado al evaluar amenazas consiste en estudiar las evidencias de erupciones pasadas del volcán de interés y los datos registrados en otros volcanes que compartan condiciones semejantes, para establecer posibles similitudes en el comportamiento eruptivo. Posteriormente se escogen los parámetros de simulación propios de cada uno de ellos, efectuando



## Revista Academia y Virtualidad

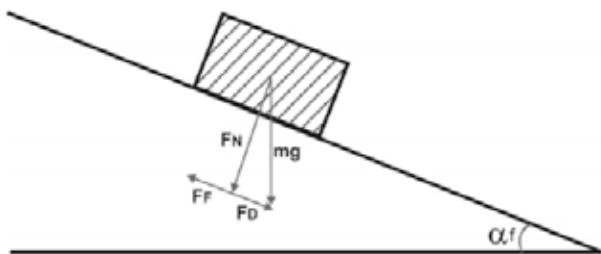
un ajuste de los mismos, hasta alcanzar los mejores resultados de acuerdo con el historial eruptivo documentado. Éste método facilita el análisis del comportamiento de cualquier volcán que se desee analizar y las consecuencias de un erupción futura.

Uno de los modelos empleados, se basa en el principio de la línea de energía en el que se relaciona la altura del punto de partida del flujo (H) y la distancia alcanzada por el flujo (L), que corresponde al ángulo de fricción aparente definido como el Coeficiente Heim ( $\mu$ ), después de Heim (1932), (figura 2), quien propuso el concepto de la línea de energía. La inclinación de la línea de Energía es el ángulo definido por  $\arctg(H/L)$ . La intersección de la línea de energía define los límites distales del flujo, que se originó en la fuente eruptiva con la superficie del suelo (Kelfoun, 2013)

La distancia vertical (h) entre la superficie del suelo y la línea de energía proporciona una manera de estimar la velocidad del flujo (ecuación 1) en este modelo.

$$v^2 = 0.5gh(1)$$

Donde v es la velocidad del flujo y g la aceleración gravitacional.



**Figura 2.** Modelo de línea de energía Heim (1932)

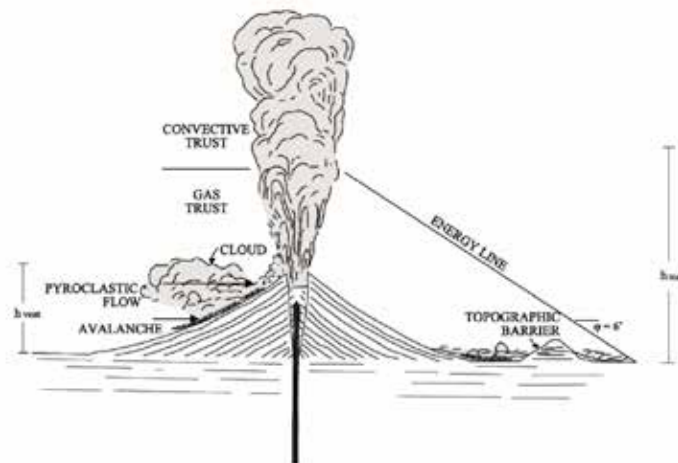
En donde la fuerza deslizante está definida por el coeficiente de fricción del terreno y la fuerza normal, en dirección contraria a la normal del plano (ecuación 2):

$$F_d = -\mu F_n \quad (2)$$

Siendo el coeficiente de fricción calculado mediante la razón entre la altura a partir de la cual ocasiona el colapso y la distancia máxima recorrida por el flujo (ecuación 3):

$$\mu = \frac{H}{L} \quad (3)$$

En la Figura 3. Se muestra la estimación del área de influencia de flujos piroclásticos según Sheridan y Malin 1982. (Alberico et al., 2002)



**Figura 3.** Estimación del área de influencia de flujos piroclásticos según Sheridan y Malin 1982 (Alberico et al., 2002, 116, pp 63-78).

## 2. Software para simulación de flujos volcánicos

A partir de la época de los 90s se desarrollaron varias herramientas computacionales con el objeto de simular este tipo de amenazas, siendo cada





## Revista Academia y Virtualidad

vez más completas y versátiles, a continuación se presenta la descripción de tres herramientas de simulación:

### 2.1 TITAN2D

TITAN2D (Sheridan et al., 2005; Sulpizio et al., 2010, Procter et al., 2010) es un programa informático desarrollado con el propósito de simular avalanchas granulares secas sobre modelos de elevación digital del terreno natural. Este programa está diseñado para simular flujos granulares tales como avalanchas de escombros y flujos piroclásticos. TITAN2D combina simulaciones numéricas de un flujo con datos de elevación digital del terreno natural soportados a través de la interfaz gráfica de un sistema de información geográfica (SIG).

El programa TITAN2D se basa en un modelo de profundidad promedio para medio continuo incompresible, en el cual se cumplen las leyes de Coulomb para un flujo granular “shallow water”. Las ecuaciones de conservación de masa (ecuación 4) y momento (ecuación 5,6) se resuelven con un término de fricción tipo Coulomb para la interacción entre los granos al interior del flujo y entre el material granular y la superficie basal. El sistema hiperbólico de ecuaciones resultante se resuelve mediante un esquema de Godunov, paralelo y de malla adaptativa. TITAN2D permite el uso de múltiples procesadores, incrementando así el poder de cómputo, disminuyendo el tiempo de procesamiento y permite el uso de grandes conjuntos de datos. Adaptar la grilla permite la concentración de la capacidad de procesamiento en las regiones de especial interés.

La conservación de la profundidad promediada de masa es:

$$\underbrace{\frac{\partial h}{\partial t}}_{\text{change in mass over time}} + \underbrace{\frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y}}_{\text{Total spatial variation of x,y mass fluxes}} = 0$$

(4)

$$\underbrace{\frac{\partial hu}{\partial t}}_{\text{Change in u mass flux over time}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( hu^2 + \frac{1}{2} k_{sp} \partial_x h^2 \right) + \frac{\partial hu v}{\partial y}}_{\text{Total spatial variation of u,y momentum fluxes in x-direction}} = \underbrace{-h k_{sp} \text{sgn} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) \frac{\partial h}{\partial y} \sin \phi_{int}}_{\text{Dissipative internal friction force in x-direction}} - \underbrace{\frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \left[ g h \left( 1 + \frac{u}{r_x \partial_x} \right) \right] \text{IRE} \phi_{bas}}_{\text{Dissipative basal friction force in x-direction}} + \underbrace{\frac{g h}{r_x \partial_x}}_{\text{Driving gravitational force in x-direction}}$$

(5)

$$\underbrace{\frac{\partial hv}{\partial t}}_{\text{Change in v mass flux over time}} + \underbrace{\frac{\partial hu v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( hv^2 + \frac{1}{2} k_{sp} \partial_y h^2 \right)}_{\text{Total spatial variation of u,y momentum fluxes in y-direction}} = \underbrace{-h k_{sp} \text{sgn} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) \frac{\partial h}{\partial x} \sin \phi_{int}}_{\text{Dissipative internal friction force in y-direction}} - \underbrace{\frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \left[ g h \left( 1 + \frac{v}{r_y \partial_y} \right) \right] \text{IRE} \phi_{bas}}_{\text{Dissipative basal friction force in y-direction}} + \underbrace{\frac{g h}{r_y \partial_y}}_{\text{Driving gravitational force in y-direction}}$$

(6)

El refinamiento de la malla capta las características del complejo flujo en el borde de la corriente, así como los lugares donde la topografía cambia rápidamente. Una malla no refinada se aplica cuando los valores de la solución son relativamente constantes o pequeños, esto para mejorar aún más la eficiencia computacional.

El modelo utilizado en TITAN2D supone una pila de material granular, que se desliza cuesta abajo por acción de la gravedad. La fricción entre partículas y entre las partículas y la superficie de tierra hacen que la pila se resista a este movimiento. Las ecuaciones que gobiernan este modelo, la conservación de la masa y la conservación del momento, se resuelven usando una solución aproximada por métodos numéricos, por ejemplo, volúmenes finitos, entre otros.

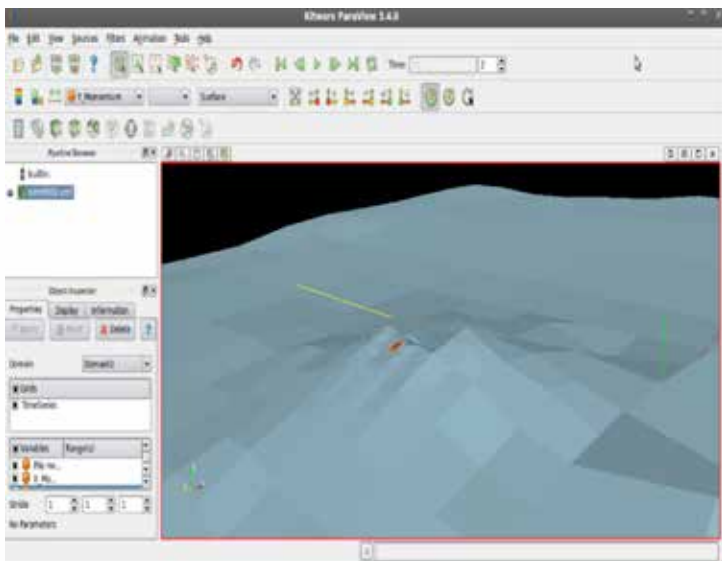
Los resultados directos de TITAN2D son profundidad de flujo y momento. Estos pueden entonces ser utilizados para calcular, en diferentes puntos, las variables observables, como altura previa, área de inundación y el tiempo y la velocidad de flujo. (University at Buffalo, 2007).



## Revista Academia y Virtualidad

TITAN2D opera a través de una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI, por sus siglas en inglés) escrita en lenguaje Python. A través de esta interfaz el usuario introduce los parámetros necesarios para ejecutar correctamente el programa, tales como dimensiones de pila, coordenadas de partida de la pila, ángulos de fricción interna y basal, y el tiempo de simulación. La simulación se calcula sobre un modelo de elevación digital (DEM) de la región deseada y los resultados se pueden visualizar a través del visualizador de TITAN2D, u otros paquetes de software de visualización. Los visualizadores de TITAN2D están diseñados para presentar a los usuarios una clara representación de las diversas propiedades del flujo, así como la altura de pila y la magnitud de la velocidad.

La Figura 4. Muestra las propiedades incorporadas en los elementos de datos que constituyen la malla poligonal están codificadas por colores y se aplican como una textura sobre el terreno.



**Figura 4.** Visualización de datos de salida de TITAN2D en el software de visualización Paraview (Tomada por los autores, Penna, Cárdenas y Morales, 2013)

### 2.1.1 Parámetros necesarios

Para simular flujos piroclásticos con el código TITAN2D, se debe definir una serie de parámetros que representan escenarios eruptivos probables, teniendo como base una magnitud definida de un posible flujo volcánico.

Tales parámetros corresponden al volumen, velocidad inicial del flujo, coordenadas iniciales, entre otros inherentes al flujo, y que en conjunto ilustran o representan el comportamiento ante unas características morfológicas dadas; y unos parámetros de entrada específicos de flujos volcánicos dentro de un rango de eventos conocidos o geológicamente posibles.

El código TITAN2D se ha empleado para la simulación de flujos piroclásticos en diferentes volcanes como son el volcán Misti, Perú (Delaite et al. 2005) y el Little Tahoma Peak, EE.UU. (Sheridan et al. 2005), el volcán Colima, México (Bursik et al. 2005; Rupp et al. 2006; Sulpizio et al., 2010), el volcán Chichón, México (Macías et al. 2008), el volcán Cerro Machín, Colombia (Murcia et al. 2010), el Mt. Taranaki, Nueva Zelanda (Procter et al. 2010), en donde los resultados han esclarecido las incertidumbres en la definición de parámetros introducidos para la simulación razonable de flujos con condiciones locales (Procter et al. 2010).

TITAN2D opera en un sistema operativo LINUX; y el usuario puede controlar la simulación a través de los siguientes datos y parámetros de entrada:

- Modelo de Elevación Digital (DEM).
- Tiempo máximo de simulación y número máximo de pasos.
- Los siguientes dos parámetros, el ángulo de fricción interna y el ángulo de fricción basal establecen las fuerzas de resistencia por



## Revista Academia y Virtualidad

fricción que se producen dentro del material que se simula, y entre el material y la superficie basal respectivamente. El ángulo de fricción interno corresponde a la fricción resultante de la interacción entre partícula y partícula dentro del material que fluye. Este valor es equivalente a la pendiente natural de la superficie libre que se forma si una pila cilíndrica del material granular se coloca en una superficie plana y deja al colapso bajo su propio peso. El ángulo de fricción basal corresponde a la fricción que se desarrolla debido a las interacciones de las partículas del suelo. Este valor es equivalente a la pendiente mínima que se debe obtener sobre una superficie para que un material colocado sobre ésta comience a deslizarse desde su posición estática.

- Volumen simulado.
- Velocidad inicial dependiendo el fenómeno a simular.
- Espesor mínimo del depósito final.
- Coordenadas de origen y dirección de la simulación.

### 2.2 VolcFlow

VolcFlow (Kelfoun, 2005; 2008; 2009) es un modelo de flujo, que se basa sobre el promediado vertical de ecuaciones de conservación de la masa y la cantidad de movimiento. Este principio es la base de la mayoría de los modelos de flujos granulares (por ejemplo: Savage and Hutter, 1991; Iverson, 1997; Heinrich et al., 2001; Patra et al., 2005) y es compatible con las evidencias de terreno relativas a la mayoría de las avalanchas de escombros y de los flujos piroclásticos densos.

Utilizando un sistema de coordenadas relacionado con la topografía, con  $x$  e  $y$  paralelos a la superficie topográfica local y  $h$  perpendicular a esta, las ecuaciones de la conservación de la masa (ecuación 7) y la cantidad de movimiento (ecuaciones 8 y 9) promediadas verticalmente son:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = gh \sin \alpha_x - \frac{1}{2} k_{acpass} \frac{\partial}{\partial x}(gh^2 \cos \alpha) + \frac{T_x}{\rho} \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(hvu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2) = gh \sin \alpha_y - \frac{1}{2} k_{acpass} \frac{\partial}{\partial y}(gh^2 \cos \alpha) + \frac{T_y}{\rho} \quad (9)$$

Donde  $h$  representa el espesor del flujo,  $u = (u \ v)$  su velocidad,  $\alpha$  la pendiente,  $\rho$  la masa volumétrica,  $T$  estrés de resistencia y  $k_{acpass}$  el factor de las fuerzas paralelas a la topografía sobre las fuerzas perpendiculares.

Las ecuaciones son resueltas utilizando un método numérico capaz de capturar los choques y las relajaciones entre los clastos (Toro, 2001). Este esquema numérico es estable hasta para las topografías complejas. El esquema fue probado a partir de soluciones analíticas exactas (Mangeney et al. 2000) y de experiencias de laboratorio (Savage and Hutter, 1991).

La ventaja de VolcFlow es que su esquema numérico fue escrito para integrar la mayor cantidad de variables sobre el espesor y la velocidad: comportamiento de fricción, viscoso, turbulento. VolcFlow puede de esta manera simular la erosión y la sedimentación. (Kelfoun, 2009).

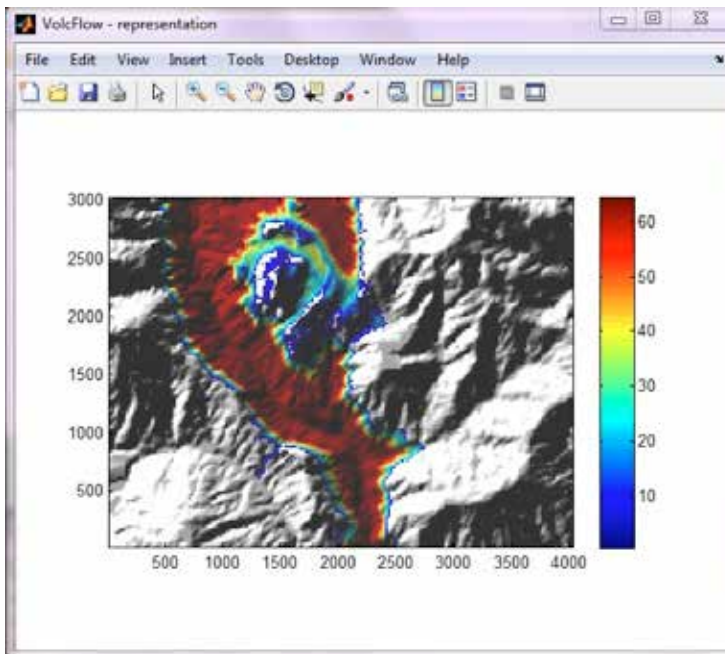
VolcFlow permite simular la formación de flujos diluidos a partir de los flujos densos y por lo tanto la sedimentación de los flujos diluidos.





## Revista Academia y Virtualidad

La Figura 5. Muestra la simulación del área de amenaza al hacer erupción el volcán Cerro Machín, esta simulación es realizada con la herramienta VolcFlow.



**Figura 5.** Simulación en VolcFlow volcán Cerro Machín (Tomada por los autores, Penna et al. 2013).

### 2.3 FLOW3D

FLOW3D (Kover, 1995; Sheridan y Kover, 1996) se basa en la generación de un modelo de elevación digital (DEM), que representa la superficie topográfica sobre la cual fluye la gravedad, moviéndose en una red irregular de triángulos (TIN).

Este modelo cinemático está construido a partir de conjuntos de datos y unas configuraciones geométricas (fuente puntual, la distribución radial, lineal o al azar) usado para establecer el modelo anterior.

El código FLOW3D proporciona velocidad histórica de las corrientes de partículas a lo largo de trayectorias de flujo en tres dimensiones. El cálculo de la resistencia a la fricción es similar al modelo de “flujo” McEwen y Malin (1989), la aceleración a lo largo del camino de descenso para cada elemento de terreno asume que el centro de masa se centra en la superficie del suelo.

Sin embargo, FLOW3D calcula resistencias viscosas y turbulentas multiplicando los coeficientes de la disipación de la energía definidos por el usuario por la velocidad de flujo, que se determina de forma incremental. Varias rutas de flujo se incrementan cada 0,1 segundos a través de elementos triangulares con un máximo de tres parámetros para el cálculo de la resistencia al corte ( $\tau$ ); fricción basal ( $a_0$ ), viscosidad ( $a_1$ ) y la turbulencia ( $a_2$ ) (McEwen y Malin, 1989).

$$\tau_r = a_0 + a_1 v + a_2 v^2$$

Las simulaciones en FLOW3D han sido verificados por pruebas de laboratorio y estudios de campo en la erupción de 1991 Unzen (Kover y Sheridan, 1993; Kover, 1995) y de 1980 El Monte Saint Helens flujos piroclásticos (Kover, 1995). Se ha aplicado a la evaluación de riesgos en varios otros volcanes, como la creación de mapas de riesgo en Popocatepetl y volcán Colima (Macías et al., 1995) y el riesgo de probabilidad en el Volcán de Colima (Saucedo et al, 1997). Recientemente, FLOW3D se utilizó para simular la historia de la velocidad y la excentricidad de bloques y ceniza “Merapi” de tipo domo en Soufriere Hills Montserrat (Hooper y Mattioli, 2001). En Colombia, se ha utilizado en la evaluación de riesgo de flujos piroclásticos en el volcán Cerro Machín (Obando y Ramos, 2003 y Obando et al, 2003).





## Revista Academia y Virtualidad

En la Tabla 1. Se realizó un cuadro comparativo de algunas características de las herramientas computacionales analizadas TITAN2D, VolcFlow y FLOW3D, considerando el sistema operativo en el cual trabajan, los autores o la institución que los desarrolló, el enfoque y las variables y parámetros de entrada y el resultado obtenido con cada uno de ellos.

Herramienta	Sistema Operativo	Autores/Institución	Enfoque/Variables	Resultado
TITAN2D	Unix Linux	Universidad de Buffalo, para modelar el comportamiento de flujos granulares	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tiempo máximo de simulación y número máximo de pasos.</li> <li>Ángulo de fricción interna</li> <li>Ángulo de fricción basal</li> <li>Volumen simulado</li> <li>Tasa y Tiempo de extrusión</li> <li>Velocidad inicial</li> <li>Espesor mínimo del depósito final</li> <li>Coordenadas de origen y dirección de la simulación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>profundidad de flujo</li> <li>momento</li> <li>mapa de amenazas</li> <li>velocidad del flujo</li> </ul>
VOLCFLOW	Windows – Linux (Corre sobre Matlab)	Karim Kelfoun/Universidad de Blaise Pascal	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tiempo máximo de simulación y número máximo de pasos.</li> <li>Ángulo de fricción interna.</li> <li>Ángulo de fricción basal.</li> <li>Umbral de cohesión.</li> <li>Densidad del flujo.</li> <li>Fuerza de resistencia.</li> <li>Viscosidad.</li> <li>Condiciones de frontera.</li> <li>Definición de la topografía.</li> <li>Velocidad inicial.</li> </ul> <p>Simula el comportamiento de flujos piroclásticos, avalanchas, tsunamis. Se utiliza para la elaboración de mapas de amenazas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Velocidad del flujo</li> <li>Espesores del depósito.</li> <li>Mapa de amenazas</li> </ul>
FLOW3D	Windows unix		<ul style="list-style-type: none"> <li>Modelo digital de elevación (MDE)</li> <li>La fricción basal</li> <li>La viscosidad</li> <li>La turbulencia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>permite estimar la velocidad de las partículas y materiales envueltos en los flujos piroclásticos</li> <li>Mapa de amenazas</li> </ul>

**Tabla 1.** Descripción de algunas herramientas de simulación de actividad volcánica

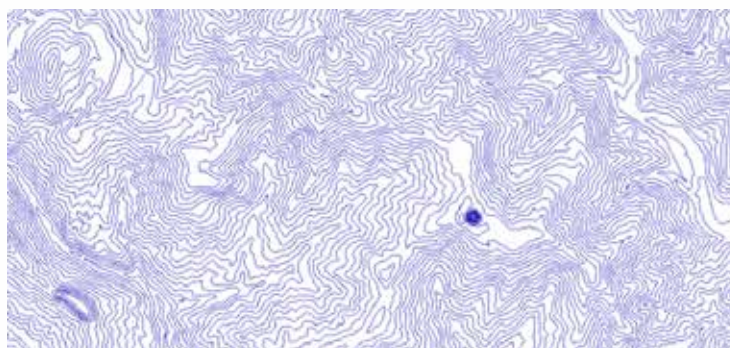
Realizada la comparación de las tres herramientas se destaca que TITAN2D y VolcFlow toman en cuenta un mayor número de variables lo que posiblemente permite asumir una mayor eficacia con respecto a FLOW3D en cuanto a velocidad de procesamiento, flexibilidad del código, implementación en multi-plataformas, entre otras. Ver Tabla 2.

TITAN2D	VolcFlow
Plataforma Linux.	Plataforma Windows con Matlab.
Grillado adaptativo con refinamiento de malla.	Volumen finito con solución numérica rápida y precisa.
Procesamiento en paralelo.	Procesamiento Simple
Acceso al código fuente	Sin acceso al código fuente
Criterios de parada	Flexibilidad debido a Matlab
Múltiples plataformas de visualización	Salida múltiple de parámetros

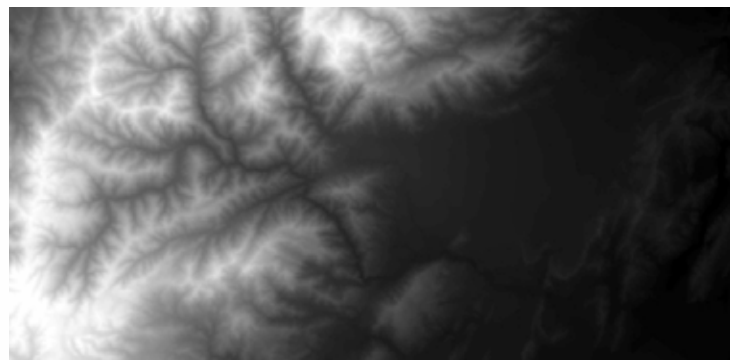
**Tabla 2.** TITAN2D Vs VolcFlow

### 3.1 Generación DEM

Para la generación del Modelo Digital del Terreno, se utilizaron las planchas topográficas a escala 1:25.000 (Figura 6) de la zona, que fueron procesadas mediante el software ArcGIS para obtener una imagen raster del terreno (Figura 7) que sirviera como dato de entrada para realizar las simulaciones en VolcFlow y TITAN2D.



**Figura 6.** Plancha topográfica del Volcán Cerro Machín (Capturada por los autores, Penna et al. 2013)



**Figura 7.** Imagen raster del volcán Cerro Machín (Capturada por los autores, Penna et al. 2013)



## Revista Academia y Virtualidad

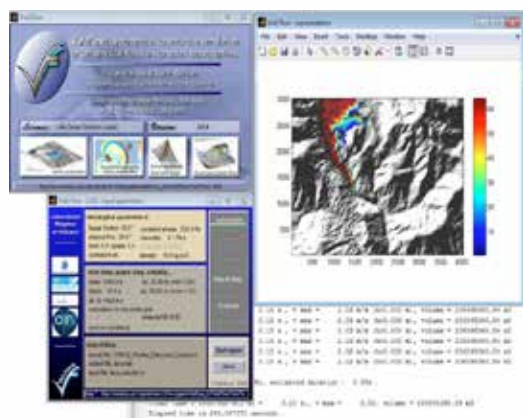
### 3.2 Resultados de pruebas en VolcFlow

En la Tabla 3. Se muestra el resultado de las simulaciones realizadas en VolcFlow considerando como parámetros de entrada fijos una viscosidad de 0.1 Pa.s; Kpass de 3.4; tensión constante 250 Pa y tiempo máximo de simulación 50000 s, los volúmenes dependen del tipo de erupción 0,3 - 0.025 km<sup>3</sup> para erupciones plinianas y 0.1 - 0.01 km<sup>3</sup> para erupciones vulcanianas.

Fricción Interna	Fricción Basal	Velocidad máxima final
33	14	2,38 m/s
33	15	2,32 m/s
33	16	2,25 m/s
34	14	2,74 m/s
34	15	2,42 m/s
34	16	2,29 m/s

**Tabla 3.** Velocidad máxima final a diferentes entradas de fricción superficial y basal

La figura 8. Muestra la salida de datos de una simulación en VolcFlow realizada al volcán Cerro Machín, entregando datos importantes a la hora de realizar un mapa de amenazas de la zona.



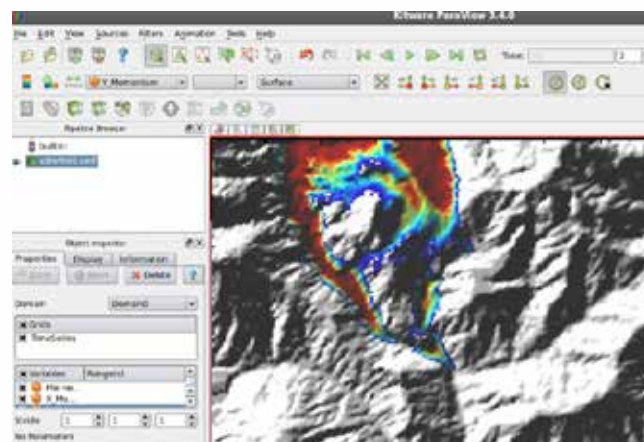
**Figura 8.** Simulación volcán Cerro Machín en VolcFlow (Tomada por los autores, Penna et al. 2013)

### 3.3 Resultados de pruebas en TITAN2D

En la Tabla 4. Se muestra el resultado de las simulaciones realizadas en TITAN2D considerando como tiempo máximo de simulación 50000 s

Fricción Interna	Fricción Basal	Velocidad máxima final
33	14	2,2455 m/s
33	15	2,2112 m/s
33	16	2,1218 m/s
34	14	2,4924 m/s
34	15	2,2347 m/s
34	16	2,1725 m/s

**Tabla 4.** Velocidad máxima final a diferentes entradas de fricción superficial y basal



**Figura 9.** Simulación volcán Cerro Machín en TITAN2D (Tomada por los autores, Penna et al. 2013)

## 4. Conclusiones

Las herramientas computacionales empleadas en la simulación de flujos piroclásticos ofrecen ventajas debido a su versatilidad basada en la combinación



## Revista Academia y Virtualidad

de diferentes variables lo que facilita la descripción y comprensión del comportamiento de las amenazas asociadas a los flujos piroclásticos.

Las primeras herramientas computacionales desarrolladas para estudiar estos procesos naturales se basaron en el modelo matemático de línea de energía propuesto inicialmente por Heim (1932); posteriormente se efectuaron modificaciones al modelo con el fin de incluir nuevas variables y hacer más eficiente el proceso de simulación.

La calidad de la simulación para todos los casos depende del tipo de información disponible, conformada por: un modelo digital de elevación con mayor resolución (5-30 m) genera representaciones más precisas y un registro del comportamiento histórico eruptivo de los volcanes a analizar, así como una caracterización de los depósitos de cada erupción.

Cada una de las herramientas computacionales es diferente de la otra en virtud del modelo matemático empleado y de las variables de simulación contempladas. Pero cada una de ellas ofrece información importante a la hora de realizar un mapa de amenazas, considerando las más apropiadas para este fin VolcFlow y TITAN2D que fueron diseñadas específicamente para el análisis de flujos granulares secos.

Es recomendable para obtener una mayor calidad en los resultados de simulación, realizar éstas con al menos dos herramientas computacionales diferentes considerando de esta manera la mayor cantidad de variables posibles y facilitando la comparación de las áreas de afectación obtenidas con cada uno de los procedimientos.

## Referencias

1. Alberico et al. (2002). A methodology for the evaluation of long-term volcanic risk from pyroclastic flows in CampiFlegrei (Italy), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 116, 63-78.
2. Bursik, M., Patra, A.; Pitman, E.B.; Nichita, C.; Macías, J.; Saucedo, R.; Girina, O. (2005). Advances in studies of dense volcanic granular flows. *Reports on Progress in Physics* 68, 271-301.
3. Constantinescu, R. (2012). Methods for quantitative volcanic hazard assessment in densely populated areas, with emphasis on pyroclastic flows. *Case study: El Misti and Arequipa, South-western. Perú.*
4. Delaite G.; Thouret J-C.; Sheridan M.; Labazuy P.; Stinton A.; Souriot T.; Westen, C-V. (2005).
5. Assement of volcanic hazards of El Misti and in the city of Arequipa, Peru, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars - Z. *Geomorphology*. N. F., 140, 209-231
6. Druitt T. (1998). Pyroclastic density currents. In Gilbert J.S and Sparks R.S. J (eds) *The physics of explosive volcanic eruptions. Geological Society of London, Special Publication* 145, 145-182.
7. Heim, A. (1932). *Bergsturz und Menschenleben:* zurich, Fretz & Wasmuth Verlag, p. 218
8. Iverson, R. (1997). The physics of debris flows, *Rev. Geophys*, 35, 245-296.
9. Hooper, D. and Mattioli, G. (2001). Kinematic modeling of pyroclastic flows produced by





## Revista Academia y Virtualidad

- gravitational dome collapse at Soufriere Hills volcano, Montserrat, *Natural Hazards* 23, 65-86.
10. Kelfoun, K.; Druitt, T. (2005), Numerical modeling of the Socompa rock avalanche, Chile. J.
  11. *Geophys. Research* 110:B12202.
  12. Kelfoun, K.; Druitt, T.; van Wyk de Vries B.; Guilbaud M - N. (2008), Topography reflection of the Socompa debris avalanche, Chile. *Bull. Volc.* 70, 1169-1187.
  13. Kelfoun, K. (2009). VolcFlow simulation of Volcanic Flows. Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Fd (OPGC), Université Blaise Pascal. Francia.
  14. Kelfoun, K. (2013) Consultoría Para La Modelización De Los Flujos Piroclástico Del Volcán
  15. Tungurahua. Proyecto Sistema de Alerta Temprana y Gestión del Riesgo Natural Instituto. Clermont-Ferrand. Francia.
  16. Kover, T.; and Sheridan, M. (1993). Numerical Models for pyroclastic flows of Mt. Unzen, *Japan. Geol. Soc. Amer. Abstracts with Programs*, 25, 268.
  17. Kover, T. (1995). Application of a digital terrain model for the modeling of volcanic flows: a tool for volcanic hazard determination. (MSc Thesis), State University of New York at Buffalo.
  18. McEwen, A.; and Malin, M. (1989). Dynamics of Mount St. Helens' 1980 pyroclastic flows, rockslide-avalanche, lahars, and blast, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 37, 205-231.
  19. Macias, J.; Carrasco, G.; Delgado, H.; Martin del Pozzo, A.; Siebe, C.; Hoblitt, R.; Sheridan, M.; Barrera, D.; Hubp, J.; and Selem, L. (1995). Mapa de Peligros Volcán de Colima, Instituto de Geofísica, UNAM, México.
  20. Macías, J.; Capra, L.; Arce, J.; Espíndola, J.; García, A.; Sheridan, M. (2008). Hazard Map of El Chichón volcano, Chiapas, México: Constraints posed by eruptive history and computer simulations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175, 444-458.
  21. Mangeney, A.; Heinrich, P.; and Roche, R. (2000), Analytical solution for testing debris avalanche numerical models, *Pure Appl. Geophys.*, 157, 1081-1096.
  22. Murcia, H.F., Sheridan, M.F., Macias, J.L., Cortés, G.P. (2010): Titan2d Simulations of pyroclastic flows at Cerro Machín volcano, Colombia: Hazards implications.- *Journal of South American Earth Sciences*. 29, 161-170.
  23. Obando, M.; y Ramos, R. (2003). Evaluación de la amenaza por flujos Piroclásticos en la localidad de Cajamarca (Tolima) ante una probable erupción del volcán Cerro Machín. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
  24. Patra, A.; Bauer, A.; Nichita, C.; Pitman, E.; Sheridan, M.; Bursik, M.; Rupp, B.; Webber, A.; Namikawa, L., and Renschler, C. (2005). Parallel Adaptive Numerical Simulation of Dry Avalanches Over Natural Terrain. *Journal of Volcanology and Geophysical. Research*. Buffalo, NY, USA



## Revista Academia y Virtualidad

25. Procter, J.N., Cronin, S.J., Platz, T., Patra, A., Dalbey, K., Sheridan, M., Neall, V. (2010). Mapping block-and-ash flow hazards based on TITAN2D simulations: a case study from Mt. Taranaki, N.Z. *Geophysical Mass Flow Modelling Group, State University of New York at Buffalo. Natural Hazard*, 53, 483-501.
26. Rupp, B.; Bursik, M.; Namikawa, L.; Webb, A.; Patra, A.; Saucedo, R.; Macías, J.; Renschler, C. (2006). Computational modeling of the 1991 block and ash flows at Colima volcano, México. *volcanic flows*. In Proc. UJST workshop on the Technology of Disaster Prevention against Local Severe Storms. *Norman OK*. 155-163.
27. Saucedo, R.; Komorowski, J.; Macías, J.; and Sheridan, M. (1997). Modeling of pyroclastic flows generated during the 1913 eruption of Colima Volcano, México. *EOS, Trans. Amer. Geophys. Union* 78, F823.
28. Savage, S.; and Hutter, K. (1991). The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part I: Analysis, *Acta Mechanica*. 86, 201-223.
29. Sheridan, M.; and Kover, T. (1996). FLOW3D: A computer code for simulating rapid, openchannel volcanic flows. In Proc. UJST workshop on the Technology of Disaster Prevention against Local Severe Storms. *Norman OK*. 155-163.
30. Sheridan, M.; Stinton, A.; Patra, A.; Pitman, E.; Bauer, A.; Nicihita, C. (2005). Evaluating Titan2D mass-flow model using the 1963 Little Tohoma Peak avalanches, Mount Rainer, Washintongton, *Journal of Volcanologi and Geophysical Research*. 139, 89-102. *Buffalo, NY, USA*.
31. Sulpizio, R.; Capra, L.; Sarocchi, D.; Saucedo, R.; Gavilanes, J.; Varley, N. (2010). Predicting the Block-and-ash flow inundation areas at Volcán de Colima (Colima, Mexico) based on the present day (February, 2010) status - *Journal of volcanology and geothermal research*. 193, 49-66.
32. Toro, E. (2001). *Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows*, John Wiley & Sons Ltd. University at Buffalo. (2007). Titan2D User Guide. *Geophysical Mass Flow Group, New York, USA*. Recuperado de <http://www.gmfg.buffalo.edu>.